

論文 コンクリート打撃音の定量的評価に関する基礎的研究

伊東良浩*¹・魚本健人*²

要旨：コンクリートの非破壊検査法の一つである打音法に着目し、打撃音に及ぼすいくつかの影響について、10cmx10cmx40cm供試体を用いての基礎的な実験および解析により検討した。これらの結果、打撃位置、打撃音測定位置などを適当に選ぶことにより、縦波共振、たわみ共振を精度よく測定することが可能であることが明らかとなった。また、このような測定法を用いて、切り欠きを有する供試体での打撃音を測定し、切り欠きによる供試体の剛性の変化にともなう共振周波数の変化を捕らえることができた。以上のことから、打音法によっても構造物の剛性の変化などに詳細な情報を得ることが可能であることが明らかとなった。

キーワード：打音法、縦波共振、たわみ共振、周波数スペクトル、ひびわれ、剛性

1. はじめに

本研究は、コンクリート構造物の調査診断において、比較的簡便で従来より補助的には頻繁に使用されている打音法に着目し、打撃音をより定量的に評価するためにいくつかの基礎的な実験および解析を実施したものである。打撃音の解釈は、測定者の経験的判断に負うところが多いと考えられていると思われるが、測定方法などを工夫することによって超音波による厚さ測定法[1]や衝撃振動測定[2]あるいは衝撃弾性波法[3]といった手法と同等の測定が可能である。

ここでは、打撃によって生じる縦波共振およびたわみ共振に注目して、これらと打撃方法や測定方法の関係、およびコンクリートに生じるひびわれがこれらの共振周波数に与える影響について検討した結果を示し、打音法によるコンクリート構造物の損傷あるいは劣化の定量的評価の可能性について述べる。

2. コンクリート打撃音に影響を及ぼす因子

2. 1 実験の概要

コンクリートの打撃音に影響を及ぼす因子としては、本来検知の対象であるコンクリートの欠陥、損傷によるもの以外に、対象物の形状、支持条件、物性値など構造物固有のもの、さらに打撃方法、打撃位置および打撃音収録位置など測定条件によるものなどが考えられる。

ここではまず、10cmx10cmx40cmの角柱供試体を用いて、供試体の打撃位置、打撃音収録位置の影響について検討する。

表-1 供試体コンクリート

用いた供試体コンクリートは打設後1年以上経過したもので、配合および物性は表-1に示すとおりである。

W/C %	単位体積重量 t/m ³	σ_{91} kgf/cm ²	弾性波速度 km/s	動弾性係数 tf/m ²
60	2.35	381	4.3	4.4x10 ⁶

*1 佐藤工業株式会社 土木本部土木部主任（正会員）

*2 東京大学教授 生産技術研究所 第5部、工博（正会員）

なお、ここで示したコンクリートの動弾性係数は、超音波伝播速度測定結果を用いて、式(1)により求めたものである。

$$Ed = Vp^2 \cdot \rho \quad (1)$$

ここで、E d:動弾性係数

V p:弾性波速度

ρ :コンクリート密度

また、打撃および測定は図-1に示すような形で実施した。

2. 2 測定位置の影響

測定位置が打撃音測定結果について及ぼす影響について検討するため、図-2に示すように標準砂の上に配置した供試体の長手方向中央部に鋼球を落下させ、マイクの位置を変化させながら打撃音を測定した。なお、この際、同時にコンクリート表面において振動加速度の測定を行った。

測定された打撃音の周波数スペクトルの例を図-3に示す。図の打撃音R1, R5および振動加速度R1の両者

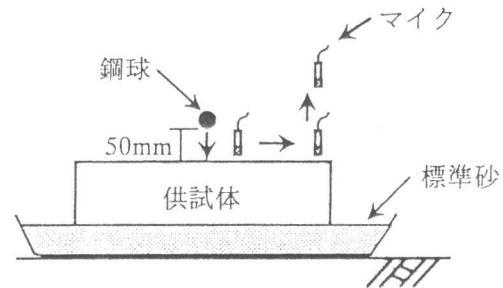


図-1 実験の概要

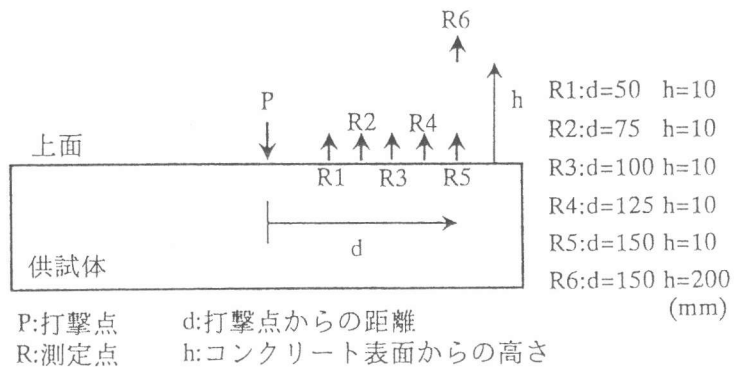


図-2 打撃点および測定点位置

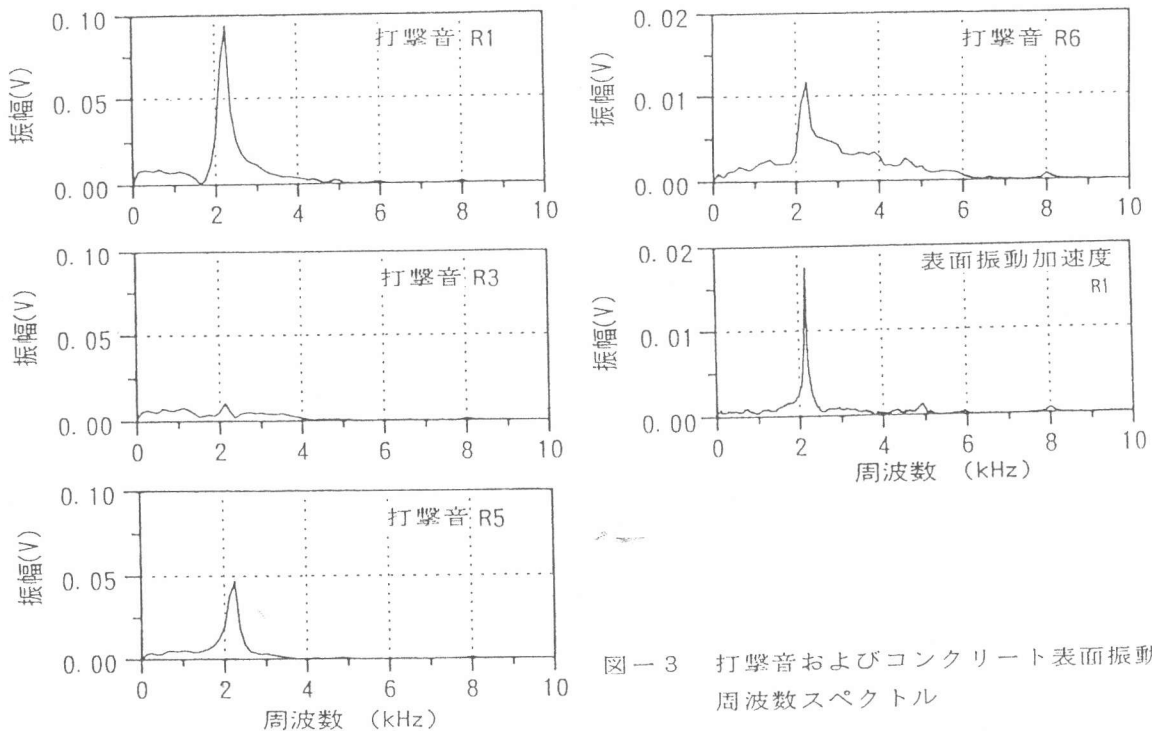


図-3 打撃音およびコンクリート表面振動の周波数スペクトル

ともに、約2.2kHzの位置に卓越周波数が認められた。一方、マイクが供試体から離れるにつれて(R6)、この卓越周波数に対して他の周波数成分が増加してくる。また、マイクの位置が供試体端部から10cmの測点R3においては、卓越周波数がほとんど認められないことがわかる。

ここで載荷条件を考慮すると、この卓越周波数が梁のたわみ振動であると考えられることから、式(2)により、一次たわみ共振周波数を求めると約2.7kHzとなった。これは、およそ測定結果と同様の値である。また、卓越周波数の周波数振幅が小さくなる測点R3は、両端自由梁の一次たわみ共振モードの節の位置（供試体長Lに対して端部から0.224Lの位置）とほぼ一致した。

$$\nu_n = \frac{\pi}{2L^2} \left(\frac{mL}{\pi}\right)^2 \dot{r} \sqrt{\frac{Ed}{\rho}} \quad (2)$$

$$\dot{r} = \frac{h}{\sqrt{12}}$$

ここで、 ν_n : n次のたわみ共振周波数

h: 供試体高さ

$$\frac{mL}{\pi} = 1.5, 2.5, 3.5, \dots, n+0.5$$

これらの結果から、打撃音はコンクリート表面の振動と強い相関があり、通常の振動測定とほぼ同様の測定結果が得られることがわかった。また、マイクをコンクリート面の近傍に配置することにより、その位置の振動に応じた振幅の音を得られ、構造物のたわみ振動モードに応じた打撃音の測定が可能であることが明らかとなった。逆に、マイクを打撃面から離すと共振周波数以外の音や外部のノイズの影響が大きくなり、測定に悪影響を及ぼすと考えられた。

2. 3 打撃位置、打撃方向の影響

打撃位置、打撃方向が打撃音に及ぼす影響を明らかにするため、図-4に示すように、たわみ振動1次モードの節の部分で供試体を支持する条件で打撃音を測定した。打撃位置は図に示すように供試体長手方向中央上部P1において縦方向から、10cmx10cm面中央P2位置において横方向から打撃を加えた。マイク位置はそれぞれ図のR1, R2の位置である。

それぞれの測定結果を図-5に示す。両者を比較するとP1位置からの打撃をR1位置で測定した場合は、前述のたわみ共振(約2.2kHz)が最も卓越しているのに対して、P2位置から打撃しR2位置において測定したものは約5.0kHzに卓越周波数があり、明らかに異なった振動を捕らえていることがわかる。後者の打撃が横方向からのものであるため、この卓越周波数は供試体軸方向の縦波共振と考えられる。ここで、弾性波速度測定結果および式

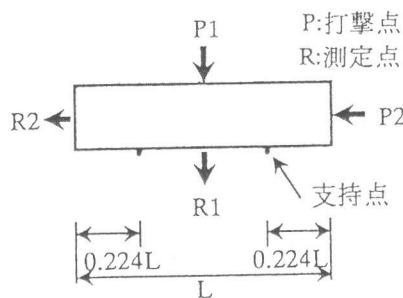


図-4 打撃位置および測定位置

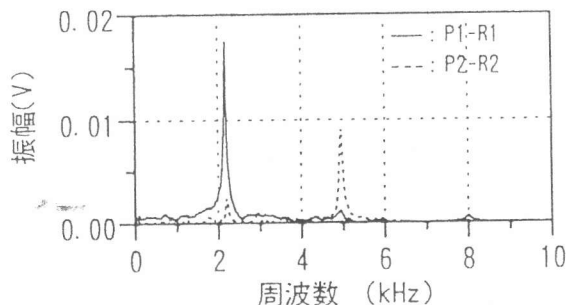


図-5 打撃方向の違いによる周波数スペクトルの変化

(3)により縦波共振周波数を求めると約5.4kHzとなり、測定結果とおよそ一致した。

$$f_L = \frac{V_p}{2 \cdot L} \quad (3)$$

ここで、 f_L ：縦波共振周波数

L ：供試体長

以上の結果から、打撃方向を変化させることによってある特定の共振を生じさせ、それを打撃音として捕らえることが可能であることが明らかとなった。

3. ひびわれを有するコンクリートの打撃音

3. 1 実験の概要

本実験では、前述の供試体の中央部に人工的に切り欠きを入れ、これが前述の共振周波数に及ぼす影響について検討する。実験では、図-6に示すように供試体中央下部で2、4、6、8cmとスリット深さを増し、それぞれの段階で前述のようにたわみ共振、縦波共振を発生させ打撃音を測定した。

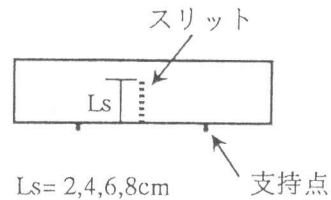


図-6 スリット位置

3. 2 実験結果

図-7はスリット深さが変化したときのたわみ共振周波数と縦波共振周波数の変化を示したものである。たわみ共振周波数はスリット深さが2cmあたりから大きく低下するが、縦波共振についてはスリット深さが8cmとなっても比較的低下率は小さい。このときのたわみ共振周波数の周波数振幅は必ずしも線形には増加していないが、スリット深さの増加とともに振幅の増大が認められ、切り欠きによるたわみ量の増大が推測された。

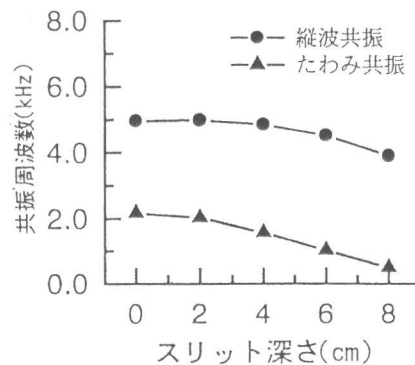


図-7 スリット深さの変化にともなう共振周波数の変化

このようなことから、コンクリート構造物にひびわれが生じた場合、その構造物の剛性が低下するため、たわみ共振周波数が低下し振幅が増大する傾向が起こるものと考えられる。他方、縦波共振については、ひび割れ深さが小さい段階ではあまり共振周波数に影響が認められず、断面の半分以上にひび割れが生じてようやくその影響が明確になってくる程度であるので、構造的な欠陥を検知するには不向きであると考えられる。

4. 解析的検討

4. 1 ポアソン比による拘束効果

これまでの実験において、弾性波速度から求めた共振周波数と実際の共振周波数はおよそ近い値であるものの必ずしも一致していない。この差異は解析で用いる弾性係数やポアソン比によってかなり影響を受けると考えられるので、ここで若干の検討を行う。

まず、均質な金属材料において、実際に生じる縦波共振と弾性波速度から算定される共振周波数がどのような関係になっているかを確認するため、4cmx4cmx48cmのアルミニウム棒で測定を行

った。一次たわみ共振モードの節の位置で支持したアルミニウム棒の共振周波数を測定し、式(3)より弾性波速度を求め、つぎに超音波伝播速度試験によって弾性波速度を求めた。得られた弾性波速度は、それぞれ4.95km/s、6.40km/sとなり一般的なアルミニウムの非拘束状態および拘束状態の弾性波速度[4]にほぼ一致し、同一供試体であっても測定法によってポアソン比による拘束効果が異なることがわかった。

このことから、10cmx10cmx40cmのコンクリート供試体においても同様のことが生じると仮定し、非拘束条件での動弾性係数と弾性波速度の式である式(3) および拘束条件下の

式(4) と実測値から求められたそれぞれの弾性波速度から動弾性係数 E_d および動ポアソン比 ν_d を求めると、それぞれ $E_d=3.8 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ 、 $\nu_d=0.24$ となった。この値を用いて2次元FEM解析(平面応力モデル)を行い、実測の周波数スペクトルと比較したものが図-8である。なお、この計算結果は時間領域における変位をフーリエ変換して求めたものである。

$$E_d = V_p^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (4)$$

計算の結果、縦波共振およびたわみ共振のいずれも卓越周波数はほぼ完全に一致しており、このような共振を取り扱う場合、ポアソン比による拘束効果がないものと考えることが適当であると判断された。現段階では、どのような寸法でこのようなことが生じうるかについては確認していないが、測定データを取り扱う上で留意すべきと思われる。

4. 2 ひびわれの影響

同様の寸法の供試体について、ひびわれの影響を解析的に評価するため、前述の物性値を用いて供試体中央下部にスリットが入ったモデルでの計算を行った。解析モデルは図-9に示すように半断面モデルとし、荷重は周波数20kHzの単位三角形波を半波長与える。

計算は、たわみ共振方向P1および縦波共振方向P2の2方向の荷重条件でスリット深さをゼロ、2.5cm、5.0cm、7.5cmに変化させて実施した。

計算の結果、得られた共振周波数は図-10のように変化した。特にたわみ共振についてはほぼ実測値と一致する。また、たわみ共振の周波数振幅の増加傾向は、図-11に示すように実測値と同様の傾向を示したが、縦波共振については実測値のばらつきが多くあまり一致しなかった。

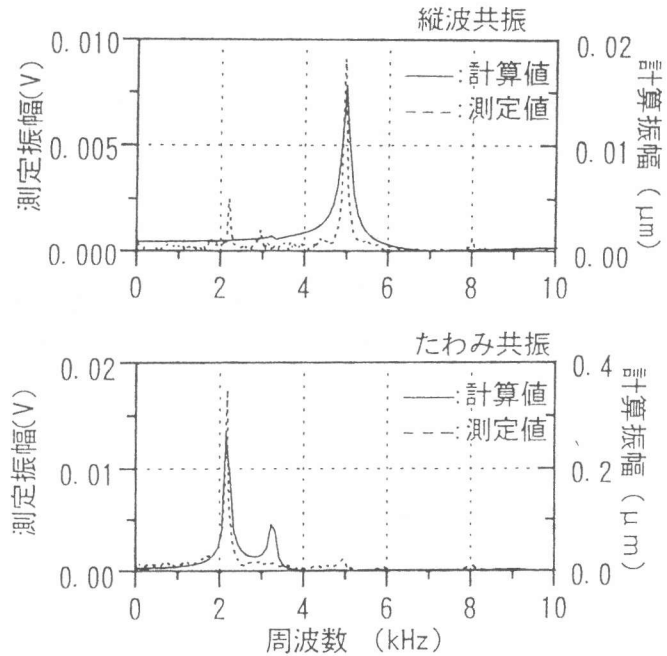


図-8 計算値と測定値の比較

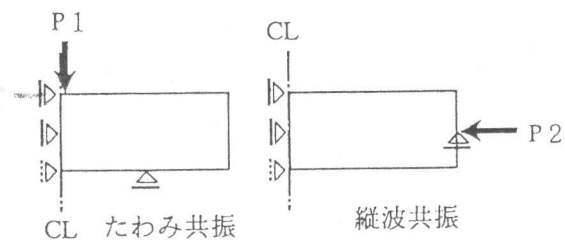


図-9 解析モデル

以上の結果から、解析結果はかなり精度よく測定値を表現しており、少なくとも10cmx10cmx40cm程度の供試体では、切り欠きをいれた供試体についても、共振特性には、ポアソン比による拘束の影響がないことがわかった。解析では、コンクリート表面の変位について、周波数特性を示したが、これと今回の実測値が非常によい一致を示していることは、打撃音の分析を振動問題として解析的に評価することが可能であることを示している。

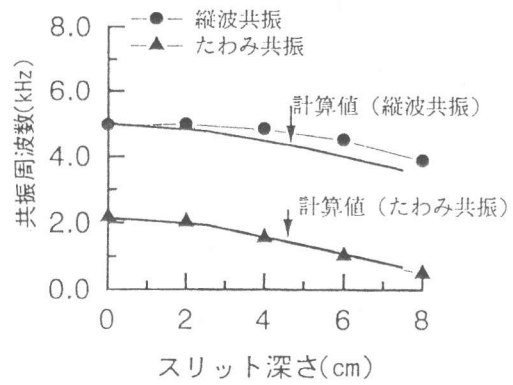


図-10 計算値と測定値の比較 (共振周波数)

5. まとめ

本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- ① コンクリート表面を打撃することによって得られる打撃音は表面の振動と強い相関があり、共振を生じるように打撃し、表面振動が大きな位置で打撃音を測定することにより、振動測定と同様に共振の測定が可能である。
- ② コンクリートのひびわれやその他の原因によって構造物の剛性が低下しているとすれば、それは、たわみ振幅の増加をともなうことが多く、打撃音の低周波数成分の増加との相関が強いと考えられる。
- ③ 10cmx10cmx40cm供試体程度の寸法で弾性波速度や動弾性係数を求める場合、超音波速度試験による方法と縦波共振を用いる方法では、ポアソン比による拘束の影響が全く異なるので、両者を混同しないよう注意すべきである。

このような測定においては、対象の形状や支持条件の違いによる影響、ノイズの問題など解決すべき点も多い。しかし、あらかじめ解析により生じるべき共振周波数や振動モードを推定しておくなどにより、構造物やその構成部材の物性値や剛性の定量的評価が可能であると考えられる。打音法は超音波法と比べ非接触での測定が可能で、測定の簡便性という意味でも非常に有効であり、今後とも、実構造物の欠陥の有無や損傷の程度を評価できる手法として研究を進めたい。

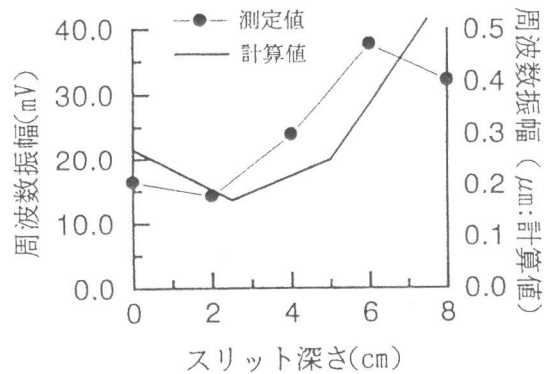


図-11 計算値と測定値の比較 (たわみ共振周波数の振幅)

参考文献

- 1) 白木徳夫、伊東良浩他：打音法によるトンネル覆工厚および覆工背面空洞の調査法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 1, pp595-600, 1993
- 2) 今井賢一、西村昭彦：衝撃振動試験による高架橋基礎の詳細調査方法について、土木学会第48回年次学術講演会概要集、No. 5, pp502-503
- 3) C. Cheng, M. Sansalone: The impact-echo response of concrete plates containing delaminations: numerical, experimental and field studies, Materials and Structures, Vol. 26, pp274-285, 1993
- 4) 理科年表1993年版、国立天文台編、p495、1993
- 5) 伊藤 毅：音響工学原論、コロナ社、p137、1955